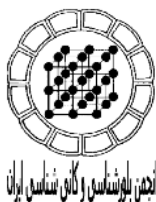
مجله
بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی ام، شمارۀ دوم، تابستان ۱۴۰۱، از صفحۀ ۲۲۳ تا ۲۳۸



کانی‌شناسی و تغییرات شیمیایی سولفوسالت‌های کانسار سرب و روی فراگرمایی آی قلعه‌سی (جنوب‌شرق تکاب، شمال‌غرب ایران)

رامین محمدی نیائی[1*]، نیما نظافتی[1]، منصور قربانی[2]، جمال شیخ‌ذکریایی[1]، فرحناز دلیران[3]

۱-گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه علوم تحقیقات تهران

۲-دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۳- انجمن علوم زمین کاربردی، بنیاد فناوری دانشگاه کارلسروهه آلمان

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۷/۱۴)

چکیده: کانسار فراگرمایی سرب و روی (نقره) آی قلعه‌سی در شمال‌غرب ایران و جنوب‌شرق تکاب واقع است. جایگاه ساختاری آن در برخوردگاه کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر با پهنه سنندج- سیرجان است. براساس بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه به روش ریزپردازش الکترونی، ترکیب این سولفوسالت‌ها از سری تنانتیت- تتراهدریت است. این کانی‌ها بیشتر در کانی‌های میزبان جایگزین شده‌اند و نتایج ریزپردازش الکترونی نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آنها وابسته به ترکیب کانی‌شناسی کانه‌های سولفیدی میزبان است. با نفوذ گنبدهای داسیتی نزدیک کانسار، سیال‌های گرمابی با گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک و به‌طور فرعی آنتیموان تشکیل می‌شوند. فعالیت دوباره گسل‌ها سبب برشی شدن کانه‌های سولفیدی اولیه شده و زمینه را برای نفوذ سیال‌های گرمابی فراهم می‌کند. نفوذ و چرخش این سیال‌ها در بخش‌های برشی شده کانسار به‌دلیل گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک، شرایط ترمودینامیکی جدیدی را برای سامانه موجب شده که خود سبب ناپایداری کانی‌های سولفیدی می‌شود. در وضعیت جدید، خرده‌های برشی کانه‌های اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت با این سیال‌ها واکنش کرده و کانه‌های سولفوسالت سری تنانتیت- تتراهدریت را بوجود می‌آورند.

واژه‌های کلیدی: *آی قلعه‌سی؛ فعالیت دوباره گسل‌ها؛ ریزپردازش الکترونی؛ گریزندگی گوگرد و آرسنیک؛ سولفوسالت سری تنانتیت– تتراهدریت.*

مقدمه

بررسی کانه‌های سولفوسالت، به‌ویژه سری تنانتیت- تتراهدریت از جنبه های مختلفی ارزشمند است، زیرا بخش مهمی از عناصر پایه چون سرب، روی و جیوه و عناصر تلوریم و بیسموت در این کانه‌ها یافت شده [۱-۴] و بخشی از نقره و طلا در این کانه‌ها تمرکز می‌یابد [۴-۶]. در برخی کانسارها چون کانسار بلیک‌وَسلی نروژ، تنها ۴۰٪ نقره کانسنگ در گالن قرار دارد و بقیه آن در کانه‌های سولفوسالتی متمرکز است [۷]. از فواید بررسی آنها درک فرآیندها و عواملی است که کانه‌زایی و تحرک دوباره عناصر را در محیط های دگرگونی، آتشفشانی و محیط‌های درون‌زاد گرمابی [۷،۲] و برون‌زاد [۹،۸] کنترل می‌کنند.

هدف اصلی این پژوهش تعیین ترکیب کانی‌شناسی کانه‌های سولفوسالتی کانسار آی قلعه‌سی و بررسی عوامل موثر بر تغییرات شیمیایی آنها در بخش‌های مختلف کانسنگ بوده است. سرانجام براساس بازدیدهای میدانی، بررسی‌های میکروسکوپی و یافته‌های ریزپردازش الکترونی، یک مدل احتمالی برای چگونگی تشکیل کانه‌های سولفوسالت سری تنانتیت- تتراهدریت پیشنهاد شده است.

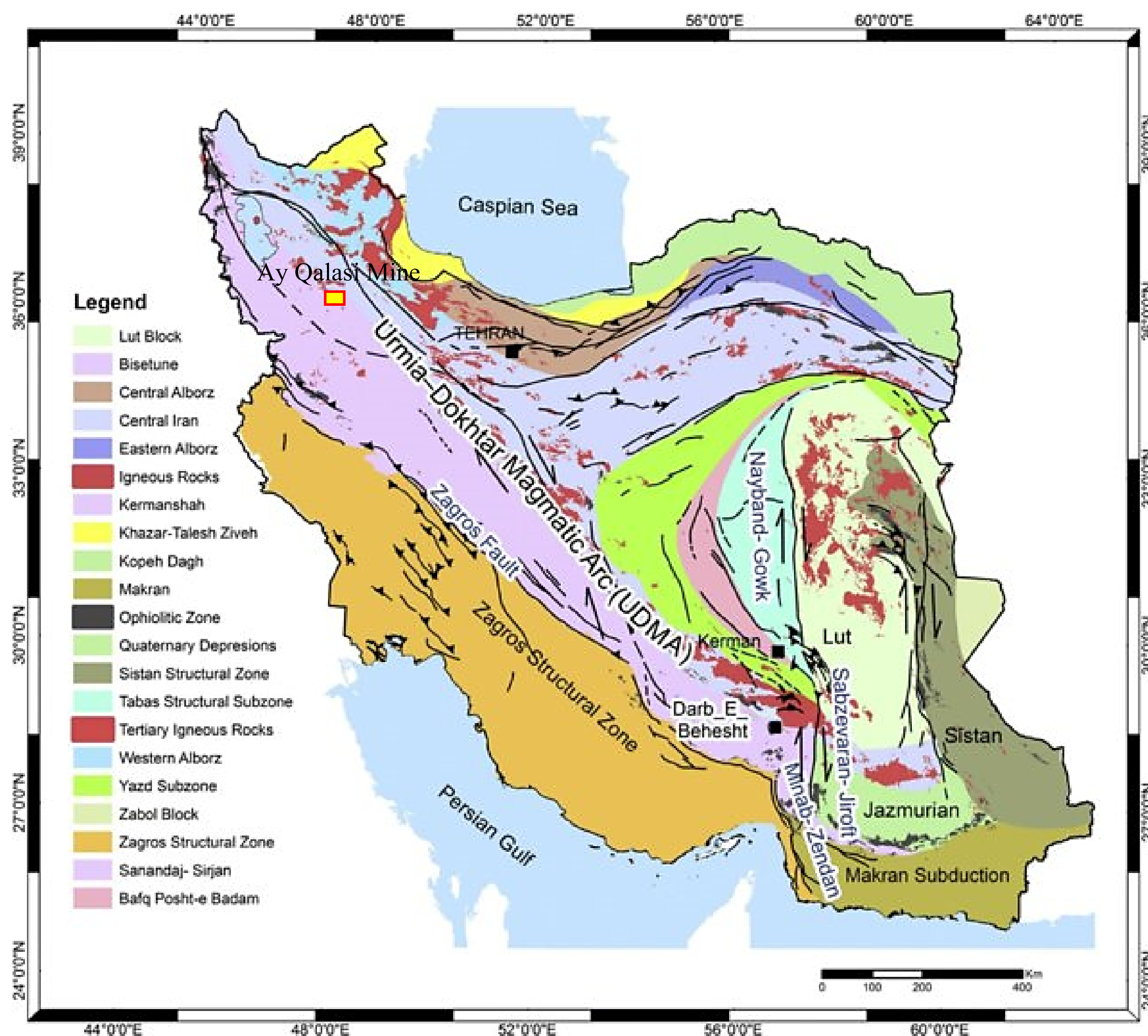
کانسار فراگرمایی سولفیدشدگی متوسط آی قلعه‌سی [۱۰-۱۲]

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۳۴۱۶۵۸۹، پست الکترونیکی: georamin@gmail.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]

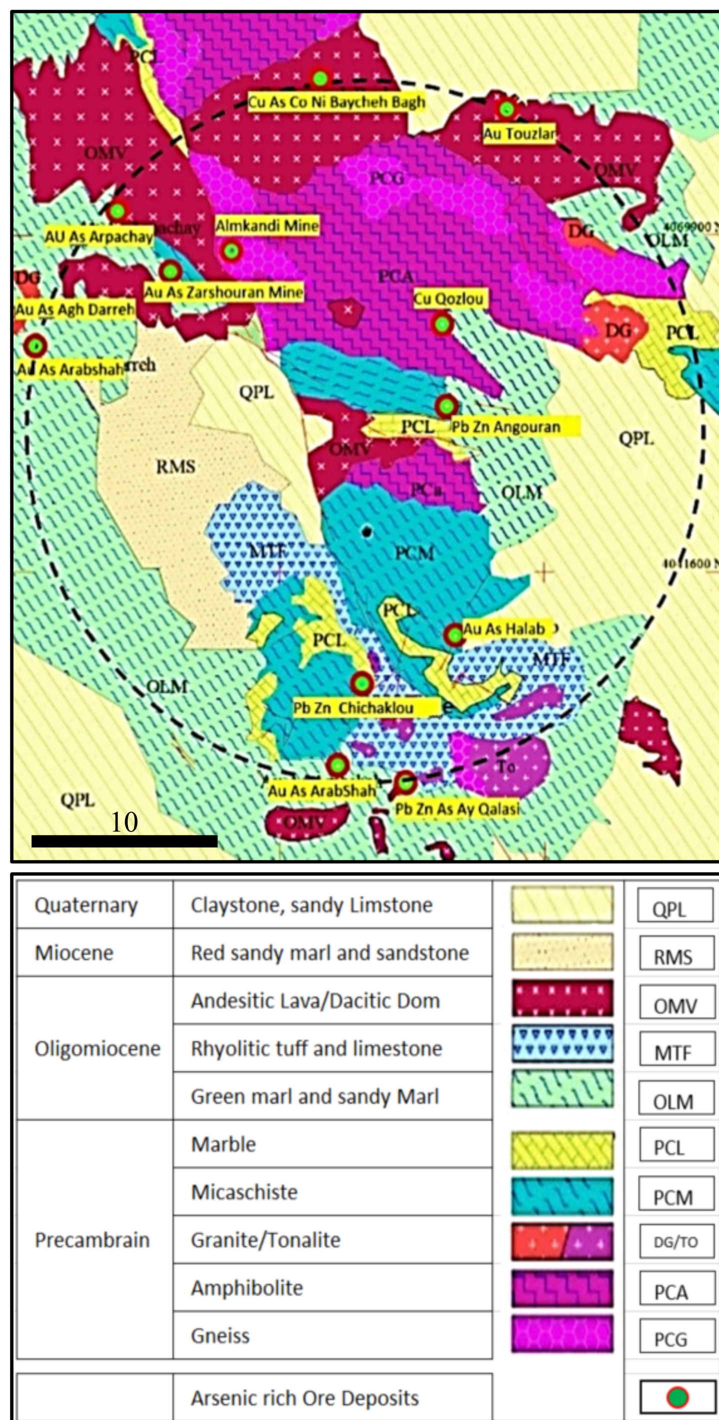
در ۳۴ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان تکاب و در مختصات جغرافیایی ″۴۰ '۲۰ °۳۶ عرض شمالی و ″۱۰ '۲۲ °۴۷ طول شرقی واقع است. کانسار آی قلعه‌سی دارای حدود ۱۰۰۰۰۰ تن ذخیره احتمالی ماده معدنی با عیار متوسط ۳ ٪ سرب و ۴٫۳ ٪ روی، ۰٫۱ ٪ مس، ۵۰ پی‌پی‌ام نقره و ۰٫۱ پی‌پی‌ام طلا است [۱۲]. این کانسار در ایالت فلززایی تکاب و در زیرپهنه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران واقع است. از دیدگاه ساختاری این زیرپهنه بخشی از پهنه ساختاری سنندج- سیرجان محسوب می‌شود [۱۳] (شکل ۱) که در برخوردگاه با کمان آتشفشانی ارومیه دختر قرار دارد [۱۵،۱۴].

زیرپهنه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران از دیدگاه فلززایی از مناطق مهم ایران بوده و میزبان کانسارهای مهمی همچون طلای زرشوران [۱۷،۱۶]، طلا- آرسنیک- آنتیموان آق‌دره [۱۸]، روی- سرب انگوران [۱۹-۲۱]؛ آرسنیک- نیکل- کبالت- بیسموت- عناصر پایه بایچه‌باغ [۲۲]، روی- سرب حلب [۲۳]؛ سرب- روی علم‌کندی [۲۴] طلای حلب [۲۵]، سرب- روی- مس قوزلو [۲۶]، طلا– آرسنیک عربشاه [۲۸،۲۷]، سرب- روی- طلای آرپاچای [۲۹]؛ طلای توزلاز [۳۰]؛ مس- طلای آق‌اتاق [۳۱]؛ سرب- روی± طلای چیچکلو [۳۲] و سرب و روی آی قلعه‌سی [۱۰-۱۲] است. گفتنی است که این کانسارها در گستره دایره‌ای‌شکل به شعاع ۳۰ کیلومتر و با مساحتی حدود ۲۸۰۰ کیلومتر مربع پراکنده هستند. مهم‌ترین ویژگی مشترک این کانسارها وجود کانه‌های آرسنیک‌دار و یا کانه‌های سولفوسالت آرسنیک‌دار در بیشتر آنهاست [۱۶-۲۹] (شکل ۲).



شکل ۱ جایگاه ساختاری کانسار آی قلعه‌سی (مستطیل زرد) در نقشه زمین‌شناسی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران برگرفته از مرجع [۱۳] با تغییرات.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]



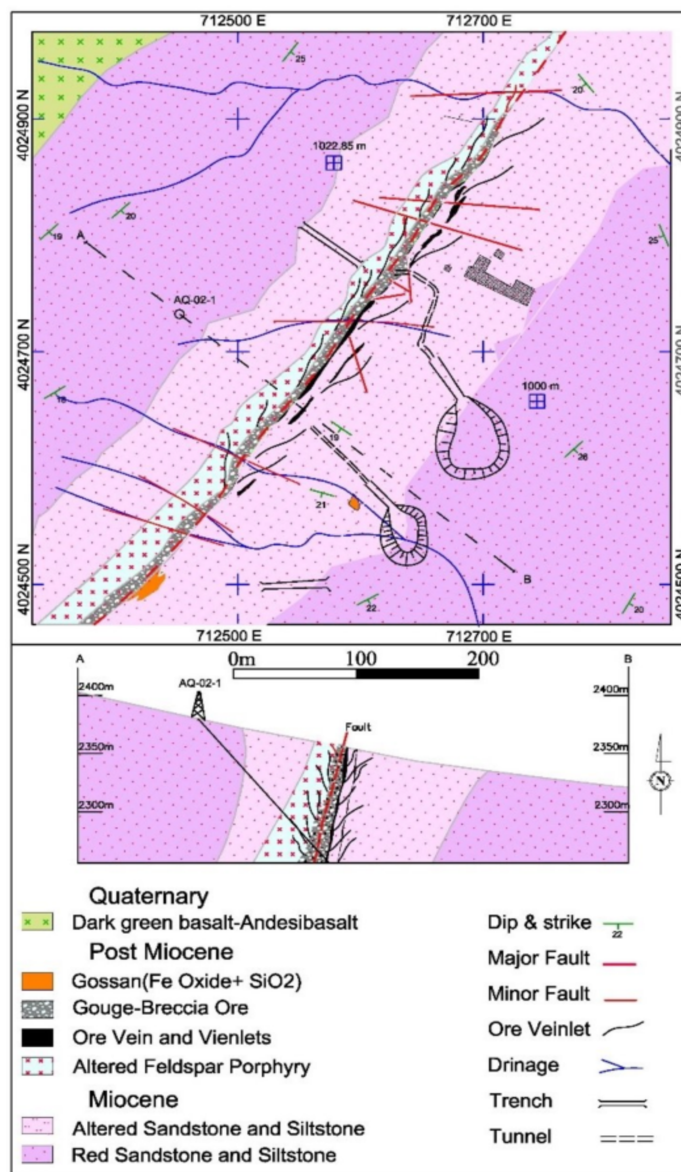
شکل ۲ نقشه پراکندگی کانسارهای فلزی در ایالت فلززایی تکاب که در آنها، کانی‌های آرسنیک‌دار دیده می‌شوند، برگرفته از مرجع [۱۵] با تغییرات.

روش بررسی

برای انجام این پژوهش افزون بر بازدیدهای صحرایی کانسار آی قلعه‌سی و تهیه نقشه زمین شناسی (شکل ۳)، مغزه‌های حفاری اکتشافی نیز بررسی شده و تعداد ۳۰ مقطع صیقلی و ۲۴ مقطع نازک- صیقلی از مغزه‌های حفاری و نمونه‌های سطحی کانسار تهیه و سپس مطالعات کانی‌شناسی و کانه‌نگاری بر آنها انجام شد. در بررسی‌های میکروسکوپی، افزون بر کانی‌شناسی و نیز کانه‌نگاری کانه‌ها، بافت‌ها، روابط بافتی، جایگاه مکانی، محل پیدایش و همیافتی آنها نیز مورد توجه ویژه قرار گرفت. بر پایه این بررسی‌ها، تعداد ۲۸ نقطه از مقاطع

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]

نازک- صیقلی و صیقلی برای تجزیه با ریزکاوالکترونی (EPMA) مدل LEO 1530VZ به‌منظور شناسایی ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی کانه‌های سولفیدی و به‌ویژه سولفوسالتی، انتخاب و به بنیاد فناوری دانشگاه کارلسروهه آلمان ارسال شدند. پردازش با شدت جریان ۲۰ میلی‌آمپر و ولتاژ ۱۵ کیلو ولت انجام گردید. براساس یافته‌ها، با توجه به درصد عناصر فرمول تجربی کانه‌ها محاسبه شد (جدول ۱).



شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰ کانسار آی قلعه‌سی و گسله‌های آن.

جدول ۱ کانی‌شناسی دگرسانی‌های کانسار آی قلعه‌سی.

دگرسانی سوپرژن	دگرسانی آرژیلیتی شدن	دگرسانی کوارتز سریسیت پیریت
گوئتیت	ایلیت	کوارتز
جاروسیت	آلبیت	پیریت
مونتموریلونیت	مونتموریلونیت	سریسیت
ژیپس	کلسیت	ایلیت
پرتلندیت	کائولینیت	

بحث و بررسی

زمین‌شناسی کانسار

رخداد کانه‌زایی سرب و روی آی قلعه‌سی در بخش‌های جنوبی ورقه ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب [۱۵] و شمال‌شرق ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تکاب [۱۴، ۳۳، ۳۴] رخنمون دارد (شکل ۱). براساس بررسی‌های صحرایی، پی‌سنگ این منطقه بیشتر شامل واحدهای دگرگونی پوشیده شده با سنگ‌های رسوبی است. مجموعه‌های دگرگونی شیستی، گنیسی و مرمرهای آهکی در دره‌های عمیق و بخش‌های شمال‌شرقی و شمال‌غربی کانسار رخنمون دارند. واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در گستره کانسار شامل واحدهای ماسه‌سنگی و لای‌سنگی قرمز رنگ میوسن است که واحدهای دگرگونی در قاعده آنها یافت می‌شوند. گنبدهای داسیتی و دایک فلدسپات پورفیری به سن پس از الیگوسن با روند شمال‌غربی- در واحد ماسه‌سنگی و لای سنگی میوسن نفوذ کرده‌اند (شکل ۳). ترکیب تقریبی این دایک از تراکی‌آندزیت تا داسیت متغیر است.

این کانسار به‌صورت رگه‌ای و عدسی‌مانند، در فضای برشی گسله‌ای با گرای ۰۳۵ و شیب ۷۵ درجه به‌سمت شمال‌غرب در مرز گسله ماسه‌سنگ‌های دگرسان شده میوسن و دایک فلدسپات پورفیری نهشته شده است. این دایک خود در یک گسل به نسبت بزرگ و عمیق در ماسه‌سنگ‌ها نفوذ کرده است. طول رگه حدود ۳۳۰ متر و پهنای آن ۰/۵ تا ۲ متر است. با در نظر گرفتن بخش‌های برشی شده، ضخامت رگه گاه به ۴ تا ۵ متر نیز می‌رسد.

سن دقیق کانه‌زایی تعیین نشده است، ولی از آنجا که رگه های ماده معدنی واحدهای سنگی میوسن را قطع کرده اند، می‌توان سن جوانی را برای آنها در نظر گرفت که کم و بیش با سن کانه‌زایی کانسارهای آقدره، زرشوران، عربشاه، حلب، توزلار، آق‌اتاق، علم‌کندی، بایچه‌باغ، چیچکلو و انگوران با سن غالب میوسن میانی تا پسین [۱۶، ۱۸، ۲۰، ۳۵] نیز همخوانی دارد. گفتنی است که با وجود سن جوان کانه‌زایی، مجموعه‌های دگرگونی میزبان چون معادن زرشوران و انگوران براساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۲۵۰،۰۰۰ تکاب و ۱۰۰،۰۰۰ تکاب و تخت‌سلیمان اغلب قدیمی‌تر از کامبرین هستند [۱۵، ۳۳].

دگرسانی

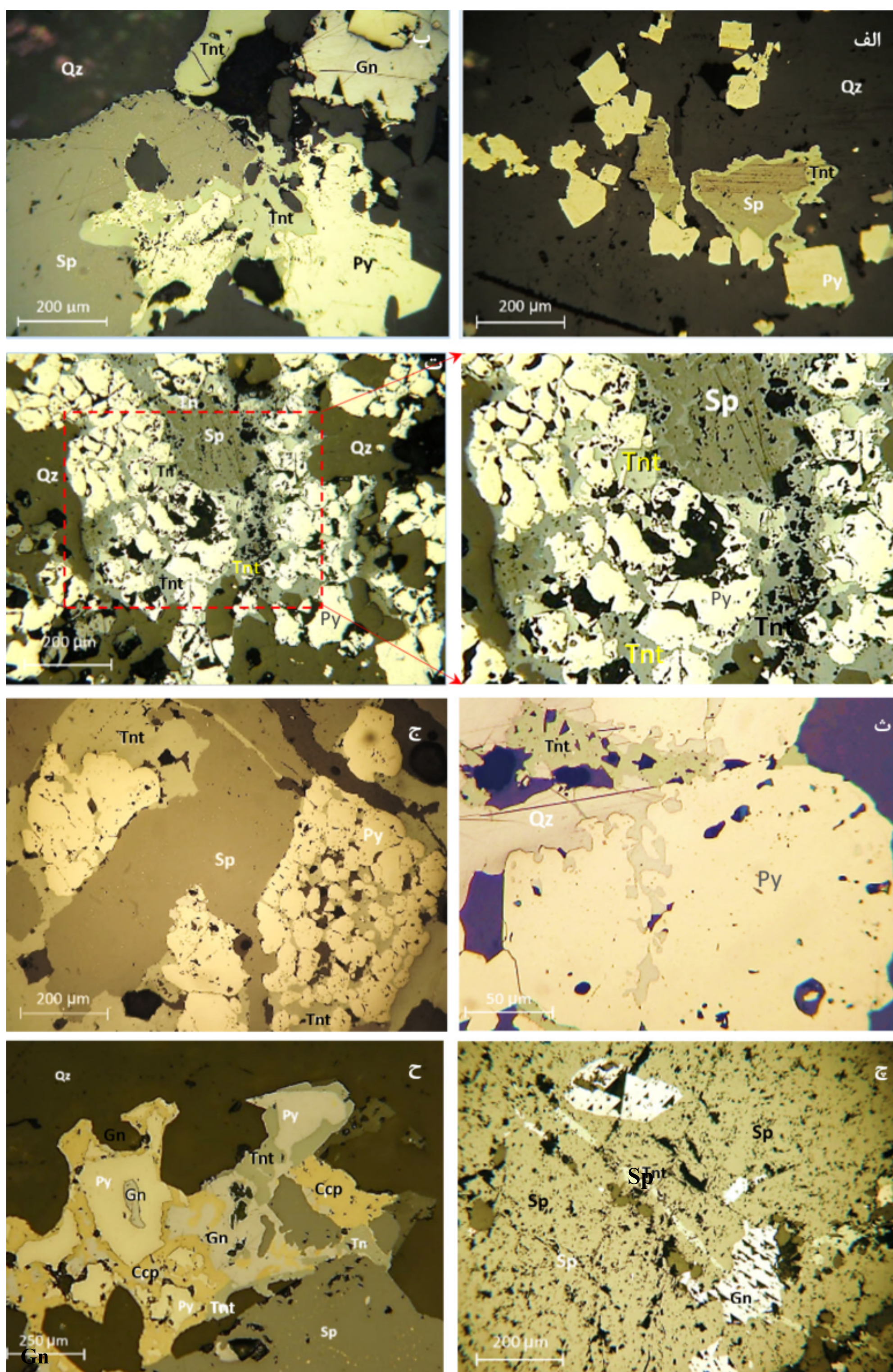
براساس نتایج پراش پرتوی ایکس (جدول ۱) و بررسی‌های میکروسکوپی مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در این کانسار عبارتند از کوارتز- سریسیت- پیریت (QSP)، سیلیسی شدن و دگرسانی‌های برون‌زاد که منجر به تشکیل اکسید- هیدروکسیدهای آهن، کربنات‌های سرب، روی، مس و کانی‌های رسی متنوعی شده است.

کانه‌زایی

بررسی‌های کانه‌نگاری نشان می‌دهد که کانسنگ آی قلعه‌سی از کانه‌های پیریت، اسفالریت‌های کالکوپیریت‌دار با بافت ناآمیختگی، گالن، کالکوپیریت به مقدار ناچیز و سولفوسالت‌های سری تنانتیت- تتراهدریت تشکیل شده است (شکل ۴) که در این سری نیز تنانتیت فراوانی بیشتری دارد. مهم‌ترین بافت‌ها ریزبرشی، انتشاری، رگچه‌ای و جانشینی هستند، که در بیشتر مقاطع دیده می‌شوند. بارزترین ساخت‌ها عبارتند از برشی، شکافه پرکن، شانه‌ای و رگه‌ای. در بخش‌های برون‌زاد کانسار، کانه‌های کالکوسیت، سروزیت، اسمیت‌زونیت و انواع مختلف کانی‌های اکسید- هیدروکسید آهن‌دار دیده می‌شوند. مهم‌ترین کانی‌های باطله موجود در رگه‌ها و برش‌های کانسار آی قلعه‌سی کوارتز، سریسیت، کانی‌های رسی به‌ویژه ایلیت، کائولینیت، مونتموریونیت و مقادیر کمی آلونیت و جاروسیت هستند (جدول ۲).

پنج مرحله کانه‌زایی در کانسار آی قلعه‌سی مشخص شده است [۱۰، ۱۲]. مرحله نخست کانه‌زایی با گسترش پهنه‌های دگرسانی فیلی (کوارتز- پیریت- سریسیت± ایلیت) و با حضور پیریت به‌صورت دانه‌پراکنده در ماسه‌سنگ‌های میزبان و فلدسپات پورفیری مشخص می‌شود (شکل ۵). مرحله دوم کانه‌زایی شامل نهشت کانه‌های اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، پیریت و کوارتز است. کانه‌های پیریت، گالن، اسفالریت و کالکوپیریت به‌صورت سیمان، قطعه‌های برشی ماسه‌سنگی و فلدسپات پورفیری را در بر گرفته‌اند. پهنای رگه‌های کانه‌دار این مرحله از ۰/۵ تا ۲ متر متغیر است. با در نظر گرفتن ضخامت بخش‌های برشی شده کانه‌دار ضخامت به ۵ متر نیز می‌رسد. مرحله سوم کانه‌زایی با تشکیل کانه‌های سولفوسالتی غنی از نقره تنانتیت- تتراهدریت مشخص می‌شود که به‌صورت رگچه‌ای لبه‌ای دیده می‌گردند و در بسیاری از نقاط کانسنگ به‌صورت سیمان، خرده‌های برشی کانه‌های سولفیدی را در برگرفته‌اند (شکل ۴). مرحله چهارم کانه‌زایی با تشکیل کوارتز و پیریت به‌صورت رگچه‌ای (با اندازه ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) و سیمان برش‌ها مشخص می‌گردد. مرحله پنجم کانه‌زایی با حضور کوارتز پرکننده فضای خالی و رگچه‌ای به اندازه ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر مشخص می‌شود. کوارتزهای این مرحله درشت‌بلور و خودشکل هستند و در شکاف‌ها بافت شانه‌ای دارند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]



شکل ۴ بافت‌های شاخص در مقاطع میکروسکوپی کانسنگ: الف- بافت جانشینی تنانتیت که به‌صورت حاشیه‌ای در لبه‌های اسفالریت جایگزین شده است، ب- بافت جانشینی تنانتیت در لبه‌های بلور برشی شده پیریت و لبه‌های اسفالریت، پ، ت- کانه تنانتیت (سبزرنگ) به‌صورت سیمان، اسفالریت و پیریت را دربرگرفته است، ث-پیریت‌های نیمه‌شکل‌دار با سطوح هضم شده و خلیج‌های خوردگی در سیمان سیلیسی، (حضور تنانتیت در بخش‌های برشی کانسنگ قابل توجه است)، ج- از بین رفتن زوایای بلورهای پیریت برشی و گردشدگی کلست‌ها در اثر جانشینی و هضم توسط محلول‌های سازنده تنانتیت، چ- بافت رگچه‌ای تنانتیت که بلورهای اسفالریت و گالن با رگچه تنانتیت قطع شده‌اند و ح- جانشینی هم‌زمان پیریت و کالکوپیریت با تنانتیت و جانشینی پیریت با کالکوپیریت.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]

جدول ۲ فرمول تجربی کانه‌های سولفوسالتی که با ریزپردازشگر الکترونی تجزیه شده‌اند.

نام کانی	فرمول تجربی کانیها	کد نمونه
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P207-F0
تنانتیت-تتراهدریت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.6}As2.5S_{13}$	K2-10a
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.4}Zn_{1.6}As3.5S_{13}$	K2-11b
تنانتیت-تتراهدریت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4Sb_{1.3}S_{13}$	K2-10d
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.4}Zn_{1.6}As_4S_{13}$	K2-11b
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}Zn_{1.9}As_4S_{13}$	AQ-P01-F06-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P01-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P01-F09-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}Zn_{1.7}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P01-F07-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P01-F09-SSb
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.2}Fe_{0.8}As_4S_{13}$	AQ-P04-F01-SS2
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.4}ZnFe_{0.6}As_4S_{13}$	AQ-P04-F01-SS1
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.2}Fe_{0.8}As_4S_{13}$	AQ-P04-F05
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.8}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P07-F0
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}Zn_{1.8}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P07-F04-SS-1
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.9}Fe_{0.1}As_4S_{13}$	AQ-P07-F04-SS-2
تنانتیت روی دار	$Cu_{9.7}Zn_{1.4}FeAs_4S_{13}$	AQ-P09-F05-SS-1
تنانتیت-تتراهدریت روی دار	$Cu_{9.7}Zn_{1.5}Fe_{0.8}Sb_{3.7}As_{0.3}S_{13}$	AQ-P09-F05-Sb-SS2
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}As_{3.35}Zn_{1.5}Fe_{0.4}S_{13}$	AQ-P09-F06-SS
گلدفلدیت ((Te)<(Sb+As))	$Cu_{11.7}Fe_{0.3}Te_{1.8}Sb_{1.1}As_{0.6}S_{13}$	AQ-P09-F08
تنانتیت روی دار	$CuZn_{1.8}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P07-F03-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.1}Ag_{0.1}ASb_4S_{13}$	AQ-P07-F01-PbSS
تتراهدریت-تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}Sb_{2.3}As_{1.7}S_{13}$	AQ-P12-F01
تتراهدریت-تنانتیت روی دار غنی از نقره	$Cu_{10}Zn_{1.7}Ag_{0.3}Sb_{3.4}As_{0.6}S_{13}$	K2-10e
تتراهدریت روی دار غنی از نقره	$Cu_{10}Zn_{11}Ag_{0.1}Sb_4S_{13}$	AQ-P07-F01-PbSSb

	Stages / Mineralogy	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Stage V	Supergene
Ore	Pyrite	▬	▬		▬		
	Chachopyrite		▬				
	Galena		▬				
	Sphalerite		▬				
	Tennantite-Tetrahedrite			▬			
	Malachite, Azurite						▬
	Chacocite						▬
	Smithsonite, Cerussite						▬
Gangue	Quartz	▬				▬	
	Sericite, Illite	▬					
	Alunite-Jarosite						▬
	Montmorillonite						▬
	Gypsum						▬
	Kaoline						▬
	Portlandite						▬
	Geothite						▬
	Calcite						▬

شکل۵ توالی همیافتی کانه‌زایی در کانسار آی قلعه‌سی[۱۲].

گسل‌خوردگی‌های پس از کانه‌زایی سبب برشی شدن رگه اصلی و آمیختگی آن با سنگ‌های کمر پایین و کمر بالای رگه و تشکیل گوج‌های رسی فراوان شده که نتیجه آن افزایش ضخامت پهنه کانه‌دار و کاهش عیار آن بوده است، به‌طوری‌که ضخامت ماده معدنی در مناطق برشی به بیش از ۵ متر نیز می‌رسد. این فرآیندها همچنین سبب گسترش فرآیندهای برون‌زاد در این کانسار و تشکیل کانه‌های اسمیت‌زونیت، سروزیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، گوئتیت و انواع مختلف کانی‌های رسی شده است.

کانی‌شناسی سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی

مهم‌ترین کانه سولفوسالتی کانسنگ آی قلعه‌سی تنانتیت بوده و مقدار ناچیزی تتراهدریت نیز تشکیل شده است. تفکیک این دو کانه در زیر میکروسکوپ دشوار است. در بررسی‌های پیشین [۱۱]، تتراهدریت تنها سولفوسالت موجود معرفی شده بود، اما ریزپردازش الکترونی نشان داد که این سری بیشتر دارای ترکیب تنانتیتی و به‌ندرت تتراهدریتی هستند [۱۲،۱۰]. تنانتیت با رنگ سبز کم‌رنگ مایل به زرد کم رنگ (شکل۴) و تتراهدریت با رنگ سبز بسیار کم رنگ دیده می‌شوند در بیشتر مقاطع بررسی شده، تنانتیت دارای فراوانی حدود ۴ تا ۵٪ بوده و اندازه آن از ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر متغیر است. این درحالی است که فراوانی تتراهدریت کمتر از ۰٫۵٪ است.

از آنجا که در این پژوهش، همیافتی کانه‌ها، محل پیدایش سری تنانتیت- تتراهدریت و بافت‌های موجود در آنها برای مدل‌سازی خاستگاهی و ته‌نشست این سری اهمیت داشته است، در ادامه بافت‌های این کانه‌ها و چگونگی همیافتی آنها با کانه‌های دیگر توضیح داده می‌شود.

بافت‌های کانه‌های سری تنانتیت- تتراهدریت

بافت جانشینی: تنانتیت اغلب دارای بافت جانشینی بوده و در لبه کانه‌های اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت گالن جانشین شده است (شکل‌های ۴ الف-د). سطوح هضم و گرد شده، شکل‌های خلیجی و باقی‌مانده کانیایی از مهم‌ترین بافت‌های شاخص جانشینی دیده شده هستند (شکل‌های ۴ ث و ج).

بافت سیمانی: در بسیاری از مقاطع بررسی شده، تنانتیت به‌صورت سیمان، خرده‌های برشی پیریتی را در برگرفته است (شکل‌های ۴ پ و ت)، قابل توجه است که بلورهای تنانتیت شکستگی و خردشدگی ندارند که این می‌تواند بیانگر تشکیل ثانویه آنها باشد.

بافت رگچه‌ای: تنانتیت به ندرت به‌صورت رگچه‌ای و میانبار در اسفالریت و گالن دیده می‌شود (شکل ۵ چ).

بافت نگاشتاری: در بزرگنمایی‌های بسیار بالا و یا در بررسی با میکروسکوپ الکترونی، بافت نگاشتاری یا میرمکیتی‌مانند بین بلورهای تنانتیت و گالن دیده می‌شود بطوریکه بلورهای بسیار کوچک گالن در اندازه‌های ۰٫۱ تا ۱۰ میکرون، به‌صورت قطرک‌ها یا شکل‌های کرم‌مانند در تنانتیت قرار دارند (شکل ۶). این نوع بافت و بافت‌های جانشینی اغلب از انواع بافت‌های واکنشی محسوب می‌شوند [۳۷،۳۶].

همیافتی و محل پیدایش کانه‌های سری تنانتیت-تتراهدریت

نکاتی در مورد محل پیدایش کانی‌های تنانتیت- تتراهدریت قابل توجه هستند که در ارائه مدل احتمالی تشکیل آنها اهمیت دارند و در ادامه بیان می‌شوند.

الف- این کانه‌ها به‌صورت حاشیه‌ای در لبه‌های کانه اسفالریت (شکل‌های ۴ الف، ب) دیده می‌شوند.

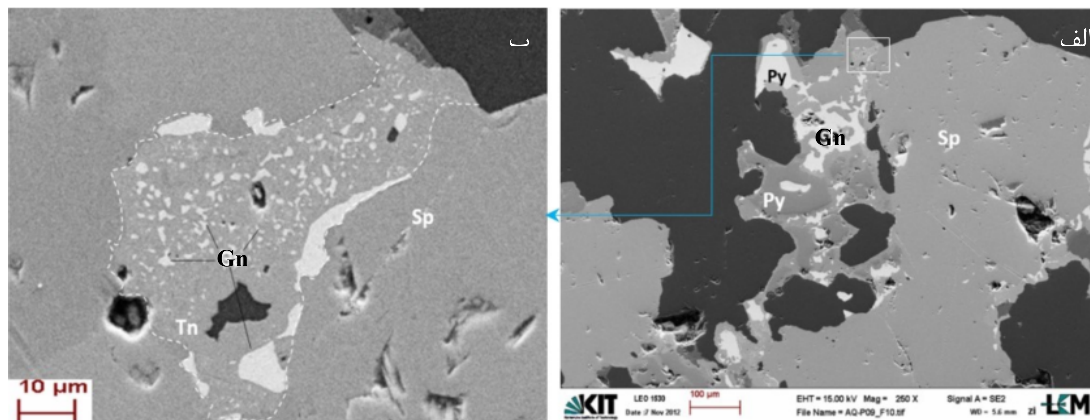
ب- این کانه‌ها به‌صورت سیمان، خرده‌های برشی کانه‌ها به‌ویژه بلورهای پیریت خرد شده را در بر می‌گیرند. به دلیل استحکام بلورهای پیریت، این کانه بیشترین مقدار برشی شدن را در تنش‌های زمین‌ساختی از خود نشان می دهد (شکل‌های ۴ پ، ت). کانه تنانتیت نیز در بخش‌های برشی و یا خرد شده کانسنگ بیشترین فراوانی را دارد (شکل‌های ۴ الف-ج و ۷ الف). کانه تنانتیت در کانسنگ توده‌ای و بخش‌هایی با بلورهای اسفالریت و گالن سالم‌تر و با خردشدگی کمتر یا دیده نمی‌شود و یا فراوانی بسیار کمی دارد (شکل ۷ ب). در این بخش‌ها نیز تنانتیت در صورت وجود بیشتر در همبری دو یا سه کانی اسفالریت، پیریت و گالن و در محل فشردگی آنها به هم دیده می‌شود (شکل‌های ۴ ب - ح و ۷ الف و ۸ الف).

پ- کانه تنانتیت بیشترین در بخش‌های دربردارنده پیریت و کالکوپیریت جایگزین شده و اغلب جانشین کالکوپیریت و سپس پیریت گردیده است (شکل‌های ۴ پ، ت، ج و ح). قابل توجه است که بلورهای پیریت خودشکل و خرد نشده آن جانشینی تنانتیت ندارند.

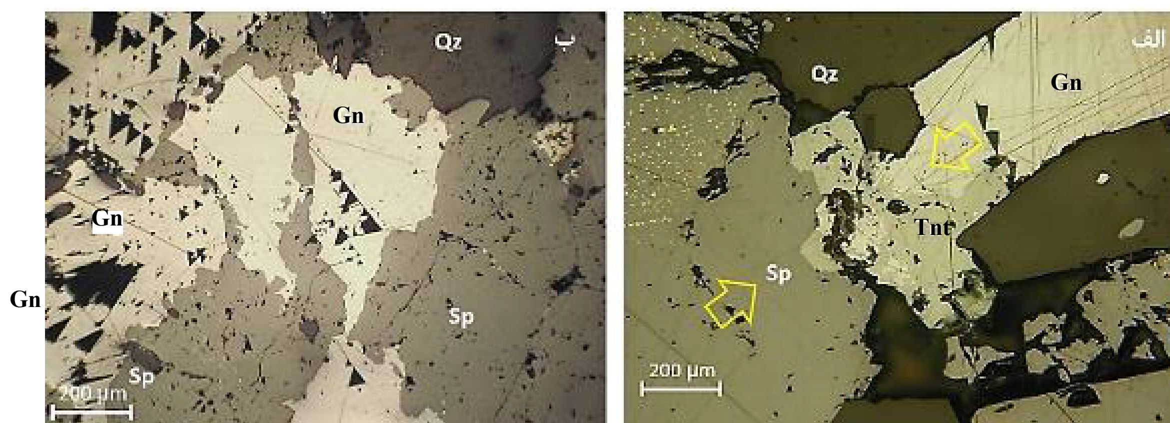
ت- در صورت جانشینی کامل تنانتیت به‌جای پیریت، یک یا چند رگچه تنانتیتی به‌درون کانه‌های کناری وارد شده‌اند (شکل ۸ الف).

ث- بلورهای اسفالریت بیشتر دارای بافت ناآمیختگی (کالکوپیریت در اسفالریت؛ تصویر ۸ ب) هستند، اما در مناطقی

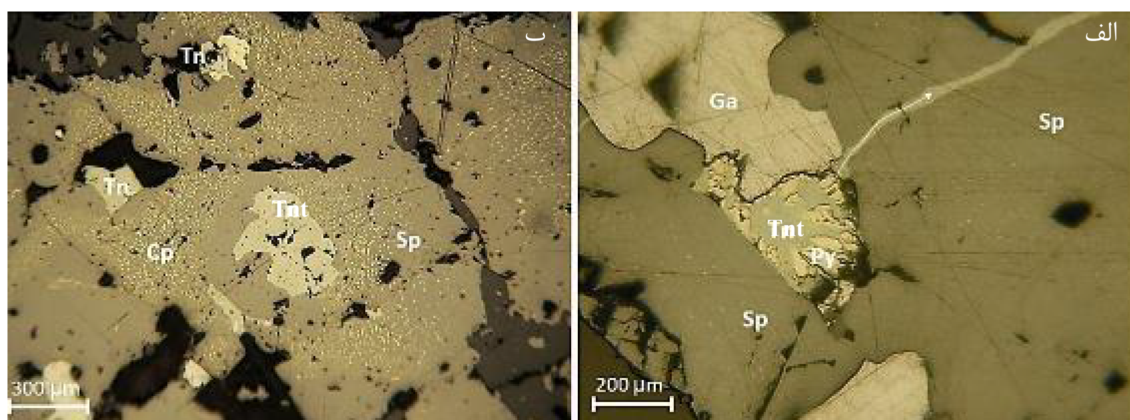
که تنانتیت به‌صورت میانبار در اسفالریت دیده می‌شود، بافت ناآمیختگی بلورهای اسفالریت پیرامون میانبار تنانتیت از بین رفته و یا به‌طور چشم‌گیری حجم آنها کاهش یافته است (شکل‌های ۷ الف و ۸).



شکل ۶ بافت نگاشتاری گالن-تنانتیت در تصویر بازتابی میکروسکپ الکترونی که قطرک‌ها و شکل‌های کرمی‌مانند گالن (سفید) با تنانتیت دربرگرفته شده‌اند (این تصویر در شکل ۴-ح آورده شده است). Ccp: کالکوپیریت، py: پیریت، Gn: گالن، Tnt: تنانییت و Qz : کوارتز.



شکل ۷ الف- تشکیل تنانتیت در محل همبری و فشردگی دو کانی گالن و اسفالریت. (به کاهش یا ناپدیدشدن قطرک‌های الکوپیریت در اسفالریت توجه شود)؛ ب- تشکیل نشدنکانه تنانتیت در اسفالریت و گالن‌های بخش‌های سالم و برشی نشده کانسنگ توده‌ای . (تصاویر در نور قطبیده متقاطع، xpl، تهیه شده‌اند).



شکل ۸ الف تشکیل تنانتیت در محل پیریت‌های برشی و خردشده در مرز اسفالریت و گالن. به مهاجرت محلول سازنده تنانتیت از محل واکنش و تشکیل رگچه‌های تنانتیت در اسفالریت توجه شود. ب میانبار تنانتیت در اسفالریت. به از بین رفتن بافت ناآمیختگی یا کاهش شدید قطرک‌های کالکوپیریت پیرامون بلورهای تنانتیت توجه شود.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]

ترکیب شیمیایی سولفوسالت‌ها بر پایه نتایج ریزپردازش الکترونی

براساس نتایج تجزیه نمونه‌های برگزیده با دستگاه ریزپردازشگر الکترونی، فرمول تجربی کانه‌ها تعیین و چکیده آن در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج پردازش برخی از آنها در جدول‌های ۲ تا ۵ آورده شده است، بررسی شیمی این کانه‌ها نتایجی را در پی داشته است که در ادامه بیان می‌شود.

الف- سولفوسالت‌های موجود بیشتر از سری تنانتیت-تتراهدریت هستند. ترکیب بخش عمده آنها به قطب غنی از آرسنیک نزدیک و تنانتیتی بوده و نسبت As به Sb در نمونه‌ها بطور متوسط ۱۷ به ۱ است (جدول‌های ۲ و ۳). به‌ندرت ترکیب‌های حداواسط و تتراهدریتی و غنی از آنتیموان نیز دیده می‌شود. در یک نمونه نیز مقداری Te وجود دارد که در ساختار کانی گلدفیلدیت وارد شده است [۱].

ب- سری تنانتیت-تتراهدریت شناسائی شده دارای مقادیر قابل توجه روی از ۴٪ تا ۸٪ است (جدول‌های ۲ تا ۵). نتایج نشان می‌دهند که کانی‌های سری تنانتیت- تتراهدریت می‌توانند در ترکیب خود تا ۱۰٪ روی داشته باشند [۳۹،۳۸] که در این حالت، تنانتیت– تتراهدریت‌های روی‌دار نامیده می‌شوند و فرمول تقریبی سری آنها $(Cu, Ag, Fe, Zn)_{12}Sb_4S_{13}$-$(Cu, Ag, Fe, Zn)_{12}As_4S_{13}$ است. درصد کاتیون‌های دوظرفیتی Cu, Ag Fe, Zn در کانسارهای مختلف متفاوت بوده و گاه ۲ تا ۳ کاتیون ممکن است وجود نداشته باشند، ولی مس اغلب وجود دارد [۳۹].

پ-ترکیب شیمیایی سولفوسالت‌های بررسی شده در بخش‌های مختلف کانسنگ متفاوت بوده و مقدار فلزات پایه آنها یعنی مس، روی، آهن و نقره وابسته به ترکیب شیمیایی کانی‌های کنار آنهاست و بسته به اینکه چه کانه‌ای با محلول‌های گرمابی گوگرد-آرسنیک‌دار هضم (جایگزین) شده باشد، ترکیب آنها تغییر می‌کند. برای مثال کانه‌های سولفوسالتی کنار گالن نقره بسیاری دارند و انواع سولفوسالت‌های جانشین اسفالریت، غنی از روی (تنانتیت‌های روی‌دار) و انواع کانه‌های سولفوسالتی که جایگزین کالکوپیریت غنی از مس شده‌اند و نیز انواع تشکیل‌دهنده سیمان پیریت برشی و جانشین پیریت، دارای مقادیر آهن بیشتری هستند (جدول ۴).

جدول ۳ نتایج تجزیه به روش ریزپردازش تنانتیت غنی از روی و مس

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۹٫۹۲	±۰٫۱۷	۴۶٫۳۷	±۰٫۲۷
Cu	۴۴٫۴۹	±۰٫۸۱	۱۷٫۳۵	±۰٫۶۴
Zn	۸٫۱۱	±۰٫۷۹	۶٫۲۳	±۰٫۶۱
As	۱۷٫۴۸	±۰٫۲۱	۱۱٫۷۲	±۰٫۱۴
	۱۰۰	-	۱۰۰	-

جدول ۴ نتایج تجزیه تتراهدریت غنی از روی و مس.

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۴٫۵۸	±۰٫۱۵	۴۳٫۸۱	±0.27
Mn	۰٫۴۴	±۰٫۱۱	۰٫۴۶	±0.11
Fe	۲٫۳۲	±۰٫۱۳	۲٫۳۸	±0.14
Cu	۳۸٫۰۴	±۰٫۷۷	۳۴٫۲۲	±0.69
Zn	۶٫۱۶	±۰٫۷۴	۵٫۳۸	±0.65
As	۱٫۳۷	±۰٫۰۷	۱٫۰۴	±0.05
Sb	۲۷٫۰۹	±۰٫۲۱	۱۲٫۷۲	±0.1
-	۱۰۰	-	۱۰۰	-

جدول ۵ نتایج تجزی تتراهدریت- تنانتیت غنی از روی و مس.

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۷٫۴۴	±۰٫۱۶	۴۶٫۴۶	±۰٫۲۷
Cu	۳۹٫۴۸	±۰٫۷۹	۳۳٫۷۳	±۰٫۶۷
Zn	۷٫۲۴	±۰٫۷۸	۶٫۰۱	±۰٫۶۵
As	۸٫۱۸	±۰٫۱۷	۵٫۹۲	±۰٫۱۲
Sb	۱۷٫۶۶	±۰٫۱۹	۷٫۸۷	±۰٫۰۸
-	۱۰۰	-	۱۰۰	-

ت- میانبارهای کرمی‌شکل با بافت نگاشتاری یا شبه‌میرمکیتی تنانتیت در واقع کانه گالن هستند. گالن تا حدود ۹۰٪ با تنانتیت جانشین شده است و میانبارها یا قطرک‌ها، در واقع باقی‌مانده‌های هضم و جانشینی گالن توسط تنانتیت هستند (شکل ۶) که در این حالت، مقدار نقره تنانتیت‌های این بخش‌ها نسبت به تنانتیت‌های جانشین پیریت و کالکوپیریت بیشتر است.

ث- بر پایه داده‌های ریزپردازش الکترونی، در یک نقطه کانه گلدفلدیت نیز شناسایی شد که در آن مقدار Te ۱۱٫۲۵ ٪ تا ۱۱٫۹۹٪ و بیش از Sb+As است [۳۸].

ج- مقدار طلای این سولفوسالت‌ها بسیار ناچیز است. مقدار نقره تنانتیت بسیار کم است، ولی تتراهدریت‌های کنار گالن گاه تا ۵۵۰۰ پی‌پی‌ام نقره دارند (جدول ۶). در مجموع، سولفوسالت‌های آنتیموان‌دار (تتراهدریت) نسبت به انواع آرسنیک‌دار (تنانتیت) نقره بسیار بیشتری دارند.

مدل احتمالی تشکیل سری تنانتیت- تتراهدریت

مانند دیگر کانی‌ها، تشکیل سولفوسالت‌ها نیز به‌روش‌های مختلف امکان‌پذیر است. برخی از کانه‌های سولفوسالتی به‌صورت اولیه و مستقیم از محلول‌های گرمابی ترسیب می-شوند [۴۰]، بعضی به‌صورت مذاب‌های برآمده از فازهای بخار با دمای بالای نزدیک به دمای ماگما دچار جدایش می‌شوند [۴۲،۴۱]. گروهی دیگر از سولفوسالت‌ها بر اثر فرآیندهای ثانویه و در نتیجه باز تحرک عناصر در محیط‌های گرمابی شکل می-گیرند [۷]، برای مثال در کانسارهای بلیک‌وَسلی نروژ، در اثر باز تحرک عناصر از سنگ معدن اصلی به سنگ دیواره، سولفوسالت‌های جدید شکل گرفته‌اند. بسیاری از پژوهشگران به‌خوبی به نقش بیسموت در تمرکز طلا و جدایش آن از سیال-های گرمابی اشاره نموده‌اند [۴۱-۴۳]. در این پژوهش، پیرامون مورد سوم تشکیل سولفوسالت‌ها بحث می‌شود.

بر پایه بازدیدهای صحرایی، بررسی‌های میکروسکوپی و ریزبافتی کانه‌ها، موقعیت مکانی آنها در کانه‌های دیگر و تجزیه‌های ریزپردازشی کانه‌ها، و بررسی پژوهش‌های انجام شده پیرامون کانسارهای دارای سولفوسالت، به‌ویژه کانه‌های سری تنانتیت-تتراهدریت روی‌دار یک مدل احتمالی برای تشکیل سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی پیشنهاد شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

با نفوذ و جایگزینی گنبدهای داسیتی و دایک‌های فلدسپات پورفیری در گستره کانسار، سیال‌های گرمابی غنی از گوگرد و آرسنیک و به مقدار کمتر آنتیموان شکل می‌گیرند. هم‌زمان فعالیت دوباره گسل‌های در برگیرنده کانسار سبب برشی شدن و خردشدگی دوباره کانسنگ اولیه به ویژه کانه‌های سولفیدی اولیه آنها چون اسفالریت‌های کالکوپیریت‌دار، گالن و پیریت می‌شود که این فرآیند بنوبه خود زمینه را برای نفوذ سیال‌های گرمابی فراهم می‌نماید. روشن است که خردشدگی کانه‌ها طی فرآیندگسلش سبب افزایش نسبت سطح به حجم کانه‌ها می‌شود و افزایش سرعت انجام واکنش‌های جانشینی را در پی خواهد دارد.

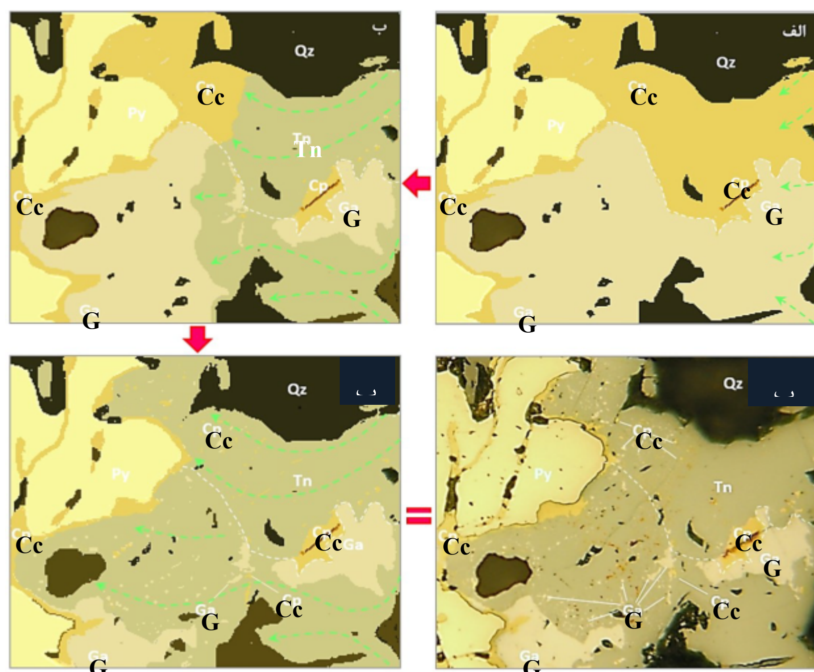
سیال‌های یاد شده با چرخش در بخش‌های برشی شده کانسار به‌دلیل گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک خود، شرایط ترمودینامیکی جدیدی را برای سامانه ایجاد کنند که سبب ناپایداری کانی‌های سولفیدی در بخش های خرد شده می-گردد. در وضعیت جدید، کانی‌های برشی شده سولفیدی چون اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت با سیال گرمابی غنی از گوگرد و آرسنیک وارد واکنش شده و کانی‌های سولفوسالت را به صرف روی اسفالریت، مسِ کالکوپیریت، آهنِ پیریت و کالکوپیریت و نقره گالن و آرسنیک-آنتیموان سیال گرمابی تشکیل می‌دهند. از دیدگاه ترمودینامیکی، کانه‌های سولفوسالتی یعنی تنانتیت-تتراهدریت پایدارترین شکل کانی‌ها در این شرایط هستند [۴۴] (شکل‌های ۸ و ۹).

در ادامه دلایل و شواهدی که این مدل بر پایه پیشنهاد شده است بیان می‌شود.

شواهد صحرایی

- فعالیت‌های آتشفشانی و پس از آتشفشان سبب تشکیل و تزریق محلول‌های غنی از آرسنیک در بخش‌های برشی شده کانسارهای قدیمی‌تر چون کانسارهای انگوران، آی قلعه‌سی و بایچه‌باغ و تشکیل کانسارهای آرسنیک- طلا یعنی زرشوران، آق‌دره، حلب و توزلار در گستره زمانی ۱۰ تا ۱۲ میلیون سال (حدود میوسن میانی تا پسین) شده است (شکل ۲) [۱۶-۳۱]. گفتنی است که آرسنیک‌زایی هنوز در منطقه ادامه دارد، بطوریکه در منطقه آی قلعه‌سی – عربشاه هنوز چشمه‌های گازدار غنی از آرسنیک دیده شده و به‌دلیل مقدار بالای آرسنیک اغلب سبب مرگ دام‌ها می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]



شکل ۹ مراحل نفوذ محلول‌های غنی از آرسنیک و گوگرد و جانشینی هم‌زمان کالکوپیریت و گالن با تنانتیت: الف- وضعیت اولیه کانه‌های گالن و کالکوپیریت پیش از نفوذ و چرخش سیال‌های آرسنیک‌دار و جایگزینی تنانتیت. پیکان‌های سبز نفوذ محلول‌های غنی از آرسنیک و خط‌چین سفید مرز اولیه گالن و کالکوپیریت در تصویر بازسازی شده را نشان می‌دهند؛ ب- هضم و جایگزینی هم‌زمان کانه‌های گالن و کالکوپیریت با محلول‌های غنی از آرسنیک و نهشت کانه تنانتیت که جایگزین حدود ۵۰٪ کانه‌های گالن و کالکوپیریت شده است (تصویر بازسازی شده)؛ پ: هضم و جایگزینی هم‌زمان کانه‌های گالن و کالکوپیریت با محلول‌های غنی از آرسنیک و نهشت کانه تنانتیت که جایگزین حدود ۹۰٪ کانه‌های گالن و کالکوپیریت شده است (تصویر بازسازی شده)؛ ت- همان فرآیند تصویر پ در نمونه واقعی و نور قطبیده (به باقی‌مانده‌های گالن و کالکوپیریت در تنانتیت توجه شود). میانبارهای گالن در زیر خط چین سفید، بیشتر گالن و میانبار بالای خط چین سفید، اغلب ترکیب کالکوپیریتی دارند.

جدول ۶ نتایج تجزیه تتراهدریت غنی از روی و نقره

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۸٫۶۳	±۰٫۱۷	۴۸٫۷۳	±۰٫۲۹
Cu	۴۲٫۶۱	±۰٫۸۶	۳۶٫۶	±۰٫۷۴
Zn	۴٫۵۱	±۰٫۸۱	۳٫۷۶	±۰٫۶۸
Ag	۰٫۵۵	±۰٫۱۲	۰٫۲۸	±۰٫۰۶
Sb	۲۳٫۷۱	±۰٫۴۹	۱۰٫۶۳	±۰٫۲۲
-	۱۰۰	-	۱۰۰	-

- فعالیت دوباره گسل‌های پس از کانه‌زایی اصلی با راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب در کانسار آی قلعه‌سی (شکل ۳) از عوامل مهم و زمینه‌ساز نفوذ سیال‌های گرمابی بوده است. زیرا با ایجاد مناطق برشی شده، شرایط نفوذ سیال‌های گرمابی غنی از گوگرد، آرسنیک و آنتیموان را فراهم می‌آورد. فعالیت دوباره گسل‌های پس از کانه‌زایی اغلب زمینه را برای نفوذ سیال‌های گرمابی و یا جوی فراهم می‌کند که در هر حال، شرایط برای تشکیل کانی‌های جدید فراهم می‌شود [۴۲،۴۱].

شواهد میکروسکوپی

- بررسی آماری محل پیدایش و موقعیت مکانی کانی‌های سولفوسالت در مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد که تقریباً در همه مقاطع، کانی‌های سولفوسالتی در کنار کانی‌های سولفیدی اولیه وجود دارند و نمی‌توان آنها را به‌صورت مجزا و منفرد مشاهده کرد.

- کانه‌های سولفوسالت اغلب در بخش های برشی شده دیده می‌شوند و در بخش‌های خرد نشده کانسنگ به‌ویژه در بخش‌های بافت توده‌ای کانسنگ، بندرت می‌توان آنها را مشاهده نمود. در عوض، بیشترین تمرکز آنها در بخش‌های برشی شده است و اغلب به‌صورت سیمان قطعه‌های برشی شده سایر کانه‌های سولفیدی را در بر می‌گیرند.

-کانه‌های پیریت و اسفالریت متناسب با چسبندگی خود، در همبری هم دچار خردشدگی، برشی شدن و درزه‌دار شدن شده‌اند (شکل‌های ۴ ب، پ، ت، ج و ح). بلورهای گالن به‌دلیل چسبندگی ویژه خود، دستخوش تغییر شکل و جهت یافتگی شده‌اند که در نمونه‌های دستی نیز به‌خوبی دیده می‌شود.

- در محل همبری سولفوسالت‌ها با کانی‌های سولفیدی، اغلب بافت‌های فروپاشی، واکنشی و غیره دیده می‌شود (شکل ۴).

- بررسی‌های ریزبافتی و تجزیه‌های ریزپردازشی نشان می‌دهند که وجود کانه‌های پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نیز در تشکیل سولفوسالت‌های سری تنانتیت- تتراهدریت و خردشدگی آنها طی تنش‌های زمین‌ساختی بسیار مهم بوده (شکل‌های ۵، ۷ الف، ۸ الف و ۹) بطوریکه وجود تنانتیت ثانویه کاملاً وابسته به‌وجود کانه‌های مس‌دار بویژه کالکوپیریت است [۱۲،۱۰]؛ بنظر می‌رسد که مس مورد نیاز برای تشکیل سولفوسالت‌ها از کالکوپیریت تامین می‌شود و در صورت نبود آنها، واکنشی بین سیال‌های با گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک و کانی‌های سولفیدی انجام نشده و کانی‌های سولفوسالتی تشکیل نمی‌شوند در این حالت، آرسنیک محلول گرمابی صرف تشکیل آرسنوپیریت و یا پیریت‌های آرسنیک‌دار می‌گردد [۴۶،۴۵]. به بیان دیگر، پیش درآمد تشکیل کانه‌های سولفوسالتی وجود کانه‌های سولفیدی و تزریق سیال گرمابی با گریزندگی بالای آرسنیک و گوگرد است. که سرانجام منجر به واکنش کانه‌ها با سیال‌های گرمابی و تشکیل سولفوسالتها می‌شود. وجود بافت‌های جانشینی تنانتیت در کالکوپیریت و از بین رفتن قطرک‌های کالکوپیریتی اسفالریت (بافت ناآمیختگی) پیرامون بلورهای تنانتیت (شکل ۸) تا حدی می‌تواند دلیلی بر مصرف مسِ کالکوپیریت برای تشکیل تنانتیت باشد. البته در این بین نباید اثر تنش‌های زمین‌ساختی و یا فشار ناشی از تبلور تنانتیت را در از بین رفتن بافت ناآمیختگی نادیده گرفت. وجود میانبارهای میکروسکوپی و ریزتر از جنس پیریت، کالکوپیریت و گالن در سولفوسالت‌ها به احتمال بسیار گویای انجام واکنش بین کانه‌های سولفیدی خرد شده و سیال گرمابی غنی از گوگرد و آرسنیک است. به بیان دیگر، وجود میانبارهای کانیایی سولفیدی در سولفوسالت‌های این کانسار که گاه بطور هم‌زمان دو تا سه نوع کانه را در بر می‌گیرند (شکل‌های ۶ و ۹) می‌تواند نشانگر رخداد این نوع واکنش‌ها باشد؛ میانبارهای کانیایی، در واقع باقیمانده‌های کانیایی کانه‌های سولفیدی طی این نوع واکنش‌ها هستند. وجود بافت نگاشتاری تنانتیت-گالن، بافت‌های جانشینی در پیریت و کالکوپیریت، سیمان تنانتیتی خرده‌های برشی پیریت و کالکوپیریت و جانشینی تنانتیت در لبه‌های اسفالریت می‌تواند از دیگر شواهد موجود باشند.

در این راستا، به‌نظر می‌رسد که آهن مورد نیاز برای تشکیل سولفوسالت‌ها نیز به احتمال از پیریت و کالکوپیریت تامین شده باشد.

شواهد بررسی ریزپردازشی کانه‌های سولفوسالتی

چنان که در پیش‌تر اشاره شد، نتایج تجزیه‌ها به روش ریزپردازش الکترونی نشان می‌دهد که ترکیب سولفوسالت‌ها در بخش‌های مختلف کانسنگ متفاوت است. چنین تغییراتی به احتمال بسیار ناشی از نوع و ترکیب شیمیایی کانی‌هایی است که با محلول‌های گرمابی گوگرد-آرسنیک‌دار وارد واکنش می‌شوند. با توجه به فرمول عمومی تنانتیت $(Cu, Ag, Fe, Zn)_{12}As_4S_{13}$ و تغییر ترکیب شیمیایی سولفوسالت‌ها (جدول ۵) نشان می دهد که سولفوسالت‌ها در نتیجه واکنش کانی‌های سولفیدی برشی شده با محلول گرمابی غنی از آرسنیک و گوگرد تشکیل شده‌اند. وجود بافت‌های واکنشی در کانی‌های سولفوسالت و سولفیدی نیز تا حدی این را تایید می‌کند.

شواهدی از کانسارهای سولفوسالت‌دار

بررسی تعدادی از انواع کانسارهایی که سولفوسالت‌های آنها در مراحل تاخیری و پایانی کانه‌زایی تشکیل شده‌اند، تا حدی می‌تواند مدل پیشنهادی برای تشکیل سولفوسالت‌های کانسار آی‌قلعه‌سی را تائید نماید. بررسی‌های بافتی این کانسارها نشان می‌دهد که در سولفوسالت‌ها و کانی‌های سولفیدی بیشتر بافت های جانشینی، واکنشی، فروپاشی [۳۷،۳۶]، خلیج خوردگی، رگچه‌ای، و میرمکیتی مانند یا نگاشتار گونه [۳۷]، باقی‌مانده کانیایی و سیمان برشی دیده می‌شود که تا حد بسیاری تشکیل آنها را به فرآیندهای زمین‌ساختی و واکنش‌های ثانویه مربوط می‌کند. این بافت‌ها در مقاطع بررسی شده کانسارهای آی قلعه‌سی [۱۲،۱۰]، زرشوران [۴۵،۱۷،۱۶]، منطقه معدنی بریکس‌لگ و شوآز تریول شمالی اتریش [۳۶] و پی‌فاندر برگ [۳۷]، قلعه زری، منطقه پی‌جویی کوه دم اردستان [۴۴] و چاه زرد اردستان [۴۸،۴۷] شوراب فردوس [۴۹] نیز شواهد خوبی از این فرآیند هستند. در کانسار قلعه‌زری در کانه گالن و سولفوسالت‌های بیسموت یعنی آیکنیت، ماتیلدیت، ویتچنیت که در مراحل دوم تا پنجم کانه‌زایی تشکیل شده‌اند، بافت‌های مشابه بخوبی دیده می شوند [۳]. گفتنی است که در بیشتر این کانسارها، کانه‌های اسفالریت، گالن و کالکوپیریت به‌عنوان کانه اصلی و یا کانه فرعی یافت می‌گردند. که این ضرورت

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]

وجود کانه‌های سولفیدی پایه را برای تشکیل سولفوسالت‌ها تائید می‌کند.

روشن است که سولفوسالت‌ها همواره از فرآیندهای ثانویه تشکیل نمی‌شوند، در بعضی از کانسارها چون کانسارهای مس منطقه شوآز و بریکس‌لگ اتریش [۳۶]، سولفوسالت‌های نسل اول به‌صورت کاملاً اولیه و سولفوسالت‌های نسل دوم به‌صورت ثانویه تشکیل شده‌اند [۳۷]. وجود مرزهای سه‌گانه تعادلی بین کانه‌های سولفوسالتی و سولفیدی نشانگر تشکیل اولیه آنها بوده که کانسارهای بلیک وسلی نروژ [۷]، کالگورلی، مِدکریتینگ، کمل‌هِسکوت و گریت بلدر استرالیا از جمله آنهاست [۱].

بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که واکنش‌های معکوس نیز امکان پذیر هستند، یعنی با تغییر شرایط ترمودینامیکی امکان ایجاد کانی‌های سولفیدی از کانی‌های سولفوسالت نیز وجود دارد. پژوهش‌های انجام شده پیرامون کانسارهای مختلف از جمله بلیک‌وسلی نروژ [۳۶،۷] نشان می‌دهد که با نفوذ محلول‌های گرمابی و تغییر گریزندگی گوگرد و دما، کانه‌های سولفوسالتی نسل اول یعنی تنانتیت، تتراهدریت گوگرد، با هم واکنش داده و کانه‌های سولفوسالتی نسل دوم چون انارژیت، کوبانیت و کانه‌های سولفیدی استیبنیت، اسفالریت، پیریت و سولفوسالت‌های سری تنانتیت–تتراهدریت نسل دوم را به‌وجود آورده‌اند [۴۵،۳۷،۳۶].

شرایط ترمودینامیکی تشکیل سولفوسالت‌ها

تغییر دما و گریزندگی عناصر در محلول‌های گرمابی به‌ویژه گوگرد از عوامل اصلی ناپایداری کانی‌ها و بازتحرک عناصر آنها در کانسارها هستند [۴۵،۳۷،۳۶]. کاهش دما، آمیختگی سیال-های گرمابی و تغییر گریزندگی گوگرد [۴۵،۳۷،۳۶]، آرسنیک، آنتیموان و تلوریم [۵۰،۳۹] نیز از عوامل ته‌نهشت سولفوسالت-ها هستند. بنظر می‌رسد که گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک برای ته‌نشست تنانتیت، گریزندگی بالای گوگرد و آنتیموان برای تشکیل تتراهدریت و نیز گریزندگی بالای گوگرد و تلوریم برای ایجاد گلدفلدیت همراه با تغییرات دمایی احتمال بسیار نقش مهمی در ناپایداری کانه‌های سولفیدی و بازتحرک عناصر آنها و نهشت سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی داشته‌اند.

برداشت

سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی بیشتر از سری تنانتیت-تتراهدریت هستند. ترکیب اصلی آنها به قطب غنی از آرسنیک نزدیک‌تر است و بیشتر ترکیب تنانتیتی دارند. ترکیب شیمیایی این کانه در بخش‌های مختلف کانسنگ متفاوت بوده و مقدار فلزات پایه آنها یعنی مس، روی، آهن و نقره وابسته به ترکیب شیمیایی کانی‌های جایگزین شده در آنهاست. به بیان دیگر، ترکیب آنها تابع ترکیب کانه‌های سولفیدی جانشین شده است.

به‌نظر می‌رسد که کانه‌های سولفوسالتی کانسار آی قلعه‌سی در فازهای تاخیری تشکیل شده‌اند و شکل‌گیری آنها در اثر جایگزینی گنبدهای داسیتی ایوب انصار و دایک های فلدسپات پورفیری در منطقه آی قلعه‌سی، گسلش و فعالیت دوباره گسل-های در بردارنده کانسار، نفوذ و چرخش محلول گرمابی برآمده از گنبدهای داسیتی بوده که سبب تغییرات دمایی و نفوذ محلول‌های با گریزندگی بالای گوگرد، آرسنیک± آنتیموان شده است. محلول‌های شکل گرفته با نفوذ و چرخش در بخش های برشی شده کانسار سبب برهم زدن تعادل کانه‌های سولفیدی و سرانجام تشکیل کانه‌های سولفوسالت سری تنانتیت-تتراهدریت به‌صرف فلزهای پایه کانه‌های سولفیدی می‌شود (شکل ۹).

قدردانی

در خاتمه نویسندگان برخود لازم می‌دانندکه از راهنمایی‌های ارزنده آقایان دکتر رشید نژاد و دکتر موسوی‌مطلق و نیز خانم دکتر یاسمی، مدیران و دست‌اندرکاران شرکت‌های توسعه معادن روی ایران، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، شرکت پویا زرکان آق‌دره، آقای مهندس حیدری و آقای کریمی از شرکت زمین معدن حلب که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار نگارندگان گذاشته‌اند، صمیمانه تشکر نمایند.

مراجع

[1] George L. L., Cook N.J., Ciobanu C.L.,, *"Minor and Trace Elements in Natural Tetrahedrite-Tennantite: Effects on Element Partitioning among Base Metal Sulphides"*, Journal of Minerals, 2017 . p. 25.

[2] George, L.L.; Cook, N.J.; Ciobanu, C.L. , *"Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores"*, Ore Geology Reviews, 2016. , p. 77

[3] Karimpour, M. H., Large, R. R., Razmara1, M., Pattrick, R. A. D.,, *"Bi- sulfosalt mineral series and their paragenetic associations in specularite-rich Cu-Ag-Au deposit, Qaleh-Zari mine, Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy , vol. 13, no. 2, 2005.

[4] Zhu Y.F., An F., Tan J., *"Geochemistry of hydrothermal gold deposits: A review"*, Geoscience frontiers, Vol. 2, no.3, 2011, Pages 367-374.

[5] Hackbarth C.J., Petersen U., *"A fractional crystallization model for the deposition of argentian tetrahedrite"*, Economic Geology 79 (3), 1984, 448–460.

alteration and mineralization", Mineralium Deposita, vol. 43, , 2008 pp. 383-404.

[19] Marangi H., Azimzadeh M., Nabatian G., Kohestani H., *"Application of mineralogy and trace/rare earth elements geochemistry to determine of strategic element-bearing phases in the Angouran Zn-Pb mine, SW Zanjan",* Journal of Advanced Applied Geology, vol. 25, , 2018, pp. 95-113.

[20] Gilg H.A., Boni M., Balassone G., Allen C.R., Banks D., Moore F., *"Marble-hosted sulphid ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex",* Mineralium Deposita, vol. 41, 2006, pp. 1-16 .

[21] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F.,*"Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran",* Mineralium Deposita, vol. 42:, 2007, pp. 799-820.

[22] Lotfi M., *"Mineralization and formation of Baycheh Bagh Ni-Co-As-Base metals in northwest of Zanjan, Iran", Quarterly of Geosciences,* vol. 53, 2004, pp. 40-55.

[23] Karami F., Kohestani H., Mokhtari M.A.A., Azimzade A.M.,, *"Geological and mineralization characteristics of Halab Zn–Pb (Ag) deposit, SW Zanjan",* second international congress of geosciences Geological Survey of Iran , 2016.

[24] Mohammadi Niaei R., *"Exploration report of Lead and Zinc of Alamkandi mine, Calcimin Company",* 2006, p.150.

[25] Nafisi R., Kouhestani H., Mokhtari M.A.A., Sadeghi M.,, *"Geological and mineralogical characteristics of Halab Au mineralization, SW of Zanjan",* in *35th national conference of earth science*, 2017.

[26] Taghilou R., Jahangiri A., Mohammadi Niaei, R., *"Investigation of mineralogy, geochemistry and P and T conditions of amphibolite rocks of Qozlou region"*, in *11th conference of Iranian Geological Society, Ferdowsi University of Mashhad*, Mashhahd, 2007.

[27] Najafzade M., Ebrahimi M., Mokhtari M.A.A., Kohestani H., *"Mineral occurance in Arabshah Carlin type mineralization of Au, As, Sb of the in the metallogenic zone of Takab-Anguaran-Takht-e-Soleyman, West Azarbaijan"*, Journal of Advanced Applied Geology, vol. 22, 2017, pp. 62-77.

[28] Heydari M., Ghaderi M., Kohestani H., *"Sediment-hosted epithermal gold mineralization of Arabeshah, SE Takab, NW Iran",* Scientific Quaterly Journal, vol. 27, no. 105, 2016, pp. 265-282.

[29] Talebi L., Mokhtari M.A.A.,, *"The Arpachay mineralization occurrence, north of Takab: an epithermal base metal mineralization in the Takab-*

[6] Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S.,*"Solubility of gold in arsenian pyrite",* Geochimica et Cosmochimica Act*a ,* Volume 69, Issue 11, 69, 2005, p2781-2796.

[7] Cook N.J., Spry P., Vokes F.M., *"Mineralogy and textural relationships among sulphosalts and related minerals in the Bleikvassli Zn-Pb-(Cu) deposit, Nordland, Norway",* Mineralium Deposita 34(1), 1998, p 35-56.

[8] Bose, P., Sharma, .A.,, *"Role of iron in controlling speciation and mobilization of arsenic in subsurface environment", Water Research* Volume 36, Issue 19, 2002, P 4916-4926.

[9] Blanchard M., Alfredsson M., Brodholt J., Wright, K., Catlow, R.,R., A., *"Arsenic incorporation into FeS2 pyrite and its influence on dissolution: A DFT study",* Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 71, Issue 3, 2007, pages 624-630.

[10] Mohammadi Niaei R., Daliran F., Nezafati N., Ghorbani M., Sheikh Zakariaei J., Kouhestani H.,*"The Ay Qalasi deposit: An Epithermal Pb–Zn (Ag) mineralization in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt of northwestern Iran",* Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, vol. 19, Issue 3, 2015pp. 263-274.

[11] Shirkhani M., *"Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Lead-Zinc Deposit of Ayqalasi, Southeast of Takab",* MS Thesis, Tarbiat Modarres University, 2008, p. 143.

[12] Mohammadi Niaei R., *"Genesis and economic Geology of Ay-Qalasi lead and zinc deposit with special emphasize on mineralization of precious metals",* PHD Thesis , 2015, p234.

[13] Sahandi R., *"Structural geology map of Iran (1: 1000000 scale)"*, Geol. Surv. of Iran, 2013.

[14] Ghorbani M., *"Geology and Metallurgy of Takab Region",* Journal of Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, 2001, p. 164-181.

[15] Alavi M., Hajian J., Amidi M., Bolourchi H., *"Geology of Takab-Saein-Qaleh, 1:250000",* Report No. 50, Geological Survey of Iran., GSI., 1982.

[16] Yousefi T, Abedini A, Aliyari F, Calagari A., *"Mineralogy and fluid inclusion investigations in the Zarshuran gold deposit, north of Takab, NW",* IranIranian Journal of Crystallography and Mineralogy, vol. 27, no. 3, 2019, pp. 537-550.

[17] Karimi M., *"The occurrence of Getchellite (AsSbS3) at Zarshuran As-Au deposit",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, vol. 17, no. 2, 2009, p:231-238.

[18] Daliran F., *"The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.3.9]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.223]

[40] M. Reed, *"Sulfide Mineral Precipitation from Hydrothermal Fluids", Reviews in Mineralogy and Geochemistry,* vol. 61, no. 1, 2006 pp. 609-631.
[41] Mohammadi Niaei R., *"Faulting an active process in formation of sulfide-nonsulfide ores of Angouran deposit",* 8th Iranian society of economic geology, Zanjan University , 2017, p.8.
[42] Tooth, B., Ciobanu, C., L., Green, L., O'Neill, B., *"Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study",* Geochimica et Cosmochimica Acta , vol. 75, no. 19, 2011, pp. 5423-5443.
[43] Henley, R., Mavrogenes, J., Tanner, D., *"Sulfosalt melts and heavy metal (As□Sb□Bi□Sn□Pb□Tl) fractionation during volcanic gas expansion: The El Indio (Chile) paleo□fumarole",* Geofluids, vol. 12, 2012, p. 199–215.
[44] Mehrabi B., Tale Fazel E., *"Mineralogy and Cu-Au-Bi ore paragenesis of Kuh-e Dom prospecting area (northeastern Ardestan), Anarak metallogenic province",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy , vol. 24, no. 4, 2017, pp. 635-646.
[45] Seal, R. R., Essene, E. J., Kelly W. C., *"Tetrahedrite and tennantite; evaluation of thermodynamic data and phase equilibria",* The Canadian Mineralogist, vol. 28, 1990, pp. 725-738.
[46] Asadi H.H., Voncken J.H.L., Kanel R.A., Hale, M., *"Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran",* Mineralium Deposita , vol. 35, 2000, pp. 656-671.
[47] Kouhestani, H., Ghaderi, M., Large, R., R., Zaw, K., *"Texture and chemistry of pyrite at ChahZard epithermal gold–silver deposit, Iran",* Ore Geology Reviews, vol. 84, 2017, p. 80–101.
[48] H. Kouhestani, *"Geology, Alteration, Isotope Geochemistry and Origin of Chah Zard Ag-Au Deposit Southwest of Yazd",* Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2011, p. 285.
[49] Mehrabi B., Tale Fazel E, *"The role of magmatic and meteoric water mixing in mineralization of Shurab polymetal ore deposit South of Ferdows: isotope geochemistry and microthermometry evidences",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy,19 (1), 2011), pp. 121-130.
[50] Whitney D. L., Evans B. W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*American Mineralogist" , 2010 Volume 95(1), pages 185–187.
Angouran-Takht-e-Soleyman metallogenic zone", Earth Sciences Journal, 2017, pp. 281-296.
[30] Heidari, S.M., Ghaderi, M., Kohestani, H., Hosseini, M., *"Touzlar Epithermal Au-Ag (Cu) Deposit, Subvolcanic Intrusion-related of Intra-Arc Extensional Setting, Northwest Mahneshan, Iran",* Earth Sciences Quarterly , vol. 94, 2015, pp. 329-348.
[31] Rahmati N., Mokhtari M.A.A., "Ebrahimi M., Nabatian G., *"Geology, mineralogy, structure and texture of Agh-Otagh base-precious metal mineralization, North Takab",* journal of petrology, 2017, Pages 157 to 180.
[32] R. Mohammadi Niaei, *"Final exploration report of Chichaklou Lead-Zinc deposit",* Internal reports of Madan-Zamin company, 2004, pp.120.
[33] Fonodi M., Hariri A., *"Geological map of 1: 100,000 Takab",* Geological Survey of Iran, 2011.
[34] M. Ghorbani, *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources",* 2013, pp.569.
[35] Daliran, F., Pride, K., Walther, J., Berner, Z.A., Bakker, R.J., *"The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide zinc carbonates mineralization",* Ore Geology Reviews , vol. 53, pp. 373-402, 2013.
[36] Krismer M., Vavtar F., Tropper P., Kaindl R., Satory B., *"The chemical composition of tetrahedrite-tennantite ores from the prehistoric and historic Schwaz and Brixlegg mining areas (North Tyrol, Austria)",* European Journal of Mineralogy, vol. 23, no. 6, pp. 925-936, 2011.
[37] Krismer M., Vavtar F., Tropper P., Kaindl R., Satory B., *"Mineralogy, mineral chemistry and petrology of the Ag-bearing Cu-Fe-Pb-Zn sulfide mineralizations of the Pfunderer Berg (South Tyrol, Italy)", Austrian Journal of Earth Sciences,* vol. 104, no. 1, pp. 36-48, 2011.
[38] Fadda S., Fiori M., Maria Grillo S., *"Chemical variations in tetrahedrite - tennantite minerals from the Furtei epithermal Au deposit, Sardinia, Italy: Mineral zoning and ore fluids evolution",* Academi of Sciences Geochemistry, Mineralogy and Petrology, vol. 43, no. Bulgarian Academi of Sciences Geochemistry, Mineralogy and Pe, 2005.
[39] Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N., Jambor J., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel Ernest H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W., Vurro F., Topa D., *"Sulfosalt systematics: a review",* Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy, European Journal of Mineralogy, vol. 20(1), 2008, pp. 7-46.